

# 全域通過フィルタによる非因果的地震波記録の リアルタイム位相補正

井出 哲\*・卜部 卓\*

## Real-time Phase Correction of Acausal Seismic Data Using Allpass Filter

Satoshi IDE\* and Taku URABE\*

### Abstract

Earthquake Observation Center (EOC), ERI is using  $\Delta$ - $\Sigma$  type AD converters with FIR digital filters at several stations of its seismic observation network. These filters produce acausal signals before the arrival of real seismic waves and this had been a problem in phase picking work. We constructed an allpass filter to minimize this acausal signal and introduced it to the automatic data processing system of EOC. The acausal signals are reduced significantly, although a few percent of them still remain in the worst case.

*Key words : FIR filter, acausal signal, automatic processing*

### はじめに

地震研究所では 1995 年から関東甲信越微小地震観測網を広ダイナミックレンジ化し、地震観測を行っている（卜部ほか, 1995）。この観測網では全観測点に固有周期 1 Hz の短周期地震計 3 成分, また一部観測点には CMG-3 T 広帯域地震計, 筑波地震観測所 (TSK) には STS-1 広帯域地震計が設置されている (図 1)。データは各観測点で明星電気株式会社製 GTA-45 U によって AD 変換され, 衛星テレメータシステムや地上専用線によって地震研究所ほか諸機関に伝送されている。原則として短周期地震計の記録は 100 Hz サンプルングで, 広帯域地震計の波形は 20 Hz サンプルングで伝送される。

GTA-45 U は内部に Crystal Semiconductor Corporation 製のアナログ変調器 CS 5323 とデジタルフィルタ CS 5322 を用い, この組み合わせによってデルタシグマ方式の AD 変換を行う。CS 5322 は線形位相特性を持つ有限インパルス応答 (FIR) フィルタである。線形位相特性の FIR フィルタでは波形の歪みは最小である反面, 信号到達時以前に非因果的信号を伴う。

図 2 にこのような非因果的信号の例を示す。図 2 a は震源決定に主に用いられている 100 Hz サンプルングの短周期地震計の波形である。初動の立ち上がり直前に細かな振動が現れており, 正確な初動走時読み取りの障害になる。実際は一部の震源近傍の観測点を除き, 一般に記録される地震波中の高周波成分は減衰が激しく, 100 Hz データ中の非因果的信号が観測される機会は少ない。

図 2 b は 20 Hz サンプルングの広帯域地震計記録である。非因果的信号は同じ程度のサンプルング数だけみだすので, 100 Hz データよりその時間は長くなる。また, しみだす周波数帯域での地震波の減衰も 100 Hz データに比べると小さいので, このような非因果的信号は良く見られる。20 Hz データは初動検測には用いないが, 広帯域データを用いた地震の初期破壊過程の解析などの場合にはやはり非因果的信号は障害になる。Scherbaum and Bouin (1997) は多数の実際の観測波形に FIR フィルタをかけて非因果的信号を作成し, これが過去に報告されている地震の初期破壊フェーズと区別しにくいことを指摘している。

Scherbaum (1996) はこの問題を指摘すると同時に, もとのフィルタの係数の値さえ既知であれば, 適切なデジタルフィルタを用いた位相補正フィルタを設計, 適用することである程度まで非因果的信号を小さくできることを示

1998 年 9 月 24 日受付, 1998 年 11 月 26 日受理.

\* 東京大学地震研究所地震地殻変動観測センター

\* Earthquake Observation Center, Earthquake Research Institute, University of Tokyo.

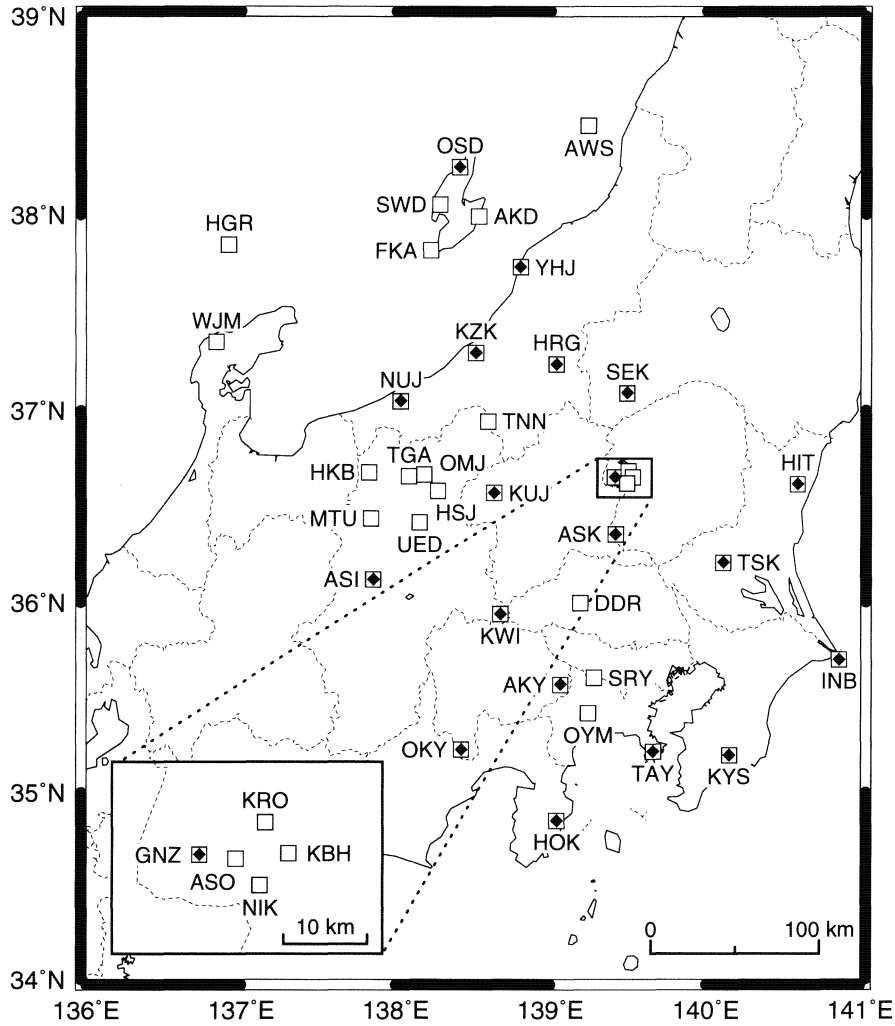


図 1. 地震研究所地震地殻変動観測センター関東甲信越微小地震観測網の GTA-45 U を使用している観測点の配置図。正方形は短周期地震計、菱形は広帯域地震計の設置観測点を示す。

した。図 2 にはその手法で補正された地震波形の例も示してある。今回、彼の方法に従い GTA-45 U の出力信号を位相補正するとともに、それを地震研究所の収録システムに組み込み、伝送されてくるデータをリアルタイム補正するようにした。

### 位相補正フィルタの設計

位相補正フィルタは Scherbaum (1996) に従って設計する。任意の入力時系列  $x_n, x_{n+1}, \dots$  に次数  $N$  の FIR フィルタ  $f_0, f_1, \dots, f_N$  をかけて出力時系列  $y_n, y_{n+1}, \dots$  を得ることは、

$$y_{i+lp} = \sum_{j=0}^N f_j \cdot x_{i+j} \quad (1)$$

という単純な掛け算、足し算で記述される。ここで、 $lp$  はフィルタによるサンプルずれを表し、直線位相 FIR フィルタの場合、 $lp = N/2$  である。時系列  $x_i, x_{i+1}, \dots$  の  $z$  変換を

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_n z^{-n} \quad (2)$$

と定義し、同様に FIR フィルタ、出力時系列の  $z$  変換を  $F(z), Y(z)$  とすると、

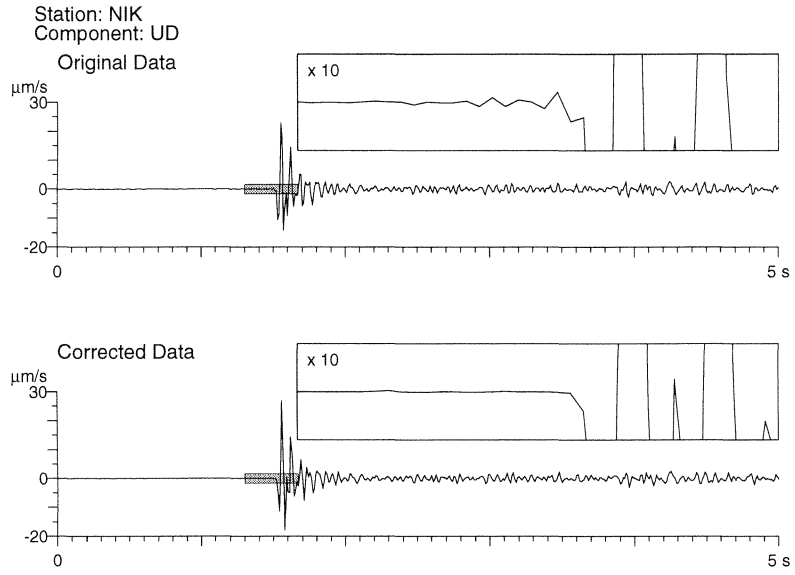
$$Y(z) = F(z) \cdot z^{lp} \cdot X(z) \quad (3)$$

という関係にある。一般に  $F(z)$  は最大位相成分  $F_{\max}(z)$  最小位相成分  $F_{\min}(z)$  の積として表現することができる。すなわち、

$$Y(z) = F_{\min}(z) \cdot F_{\max}(z) \cdot z^{lp} \cdot X(z) \quad (4)$$

である。 $F_{\max}(z)$  は  $F(z)$  の  $z$  平面上の零点のうち単位円の外にあるものを零点とする多項式、 $F_{\min}(z)$  は単位円上および円内にあるものを零点とする多項式である。中、外という言い方は  $z$  変換の定義 (2) 次第で、逆に書いてある文献もある。出力信号が因果的であるためには位相特性は最小位相でなければならない。すなわち位相の補正とは、この最大位相成分  $F_{\max}(z)$  を振幅特性が同じ最小位相成分  $MinPhase\{F_{\max}(z)\}$  で置き換えることである。正確に言え

a)



b)

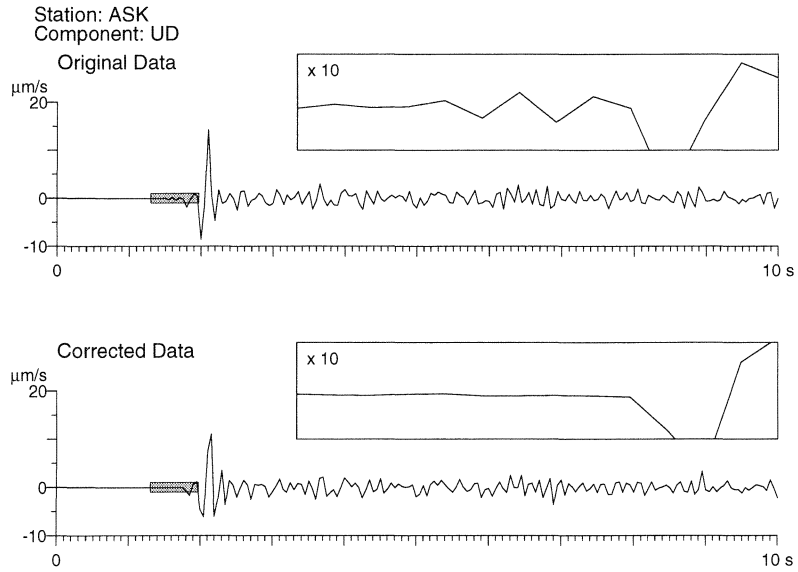


図 2. 非因果的しみだしを持つデータとそれを位相補正した後のデータの例. a) 100 Hz サンプリングの短周期地震波形. b) 20 Hz サンプリングの広帯域地震波形.

ばさらに出力の時間ずれ  $lp$  を補正する必要がある. 補正後の出力を  $Y'(z)$  とすると,

$$Y'(z) = F_{\min}(z) \cdot \text{MinPhase}\{F_{\max}(z)\} X(z) \quad (5)$$

$\text{MinPhase}\{F_{\max}(z)\}$  は  $F_{\max}(z)$  の零点の逆数を零点とするような多項式であり, それは  $z$  の代わりに  $1/z$  を代入すれば求められる. 従って,

$$\text{MinPhase}\{F_{\max}(z)\} = F_{\max}(1/z) \cdot z^N \quad (6)$$

である. これを時系列で表した場合の係数は元の多項式の係数の順番を反転することで得られる.  $Y(z)$  を  $Y'(z)$  に変換するには

$$Y'(z) = H(z) \cdot z^{-lp} \cdot Y(z) \quad (7)$$

$$H(z) = \frac{F_{\max}(1/z) \cdot z^N}{F_{\max}(z)} \quad (8)$$

とすればよい. 式の形から明らかなように  $H(z)$  は単位円をはさんで対称な零点・極の配置を持つ. すなわち振幅特性が平坦な全域通過フィルタである. しかし単位円の外側に極を持つので, (7) のまま計算すると  $Y'(z)$  は発散する.  $Y'(z)$  を安定に求めるためには時間軸を逆向きにして計算する必要がある. すなわち, 一旦

$$Y'(1/z) = H(1/z) \cdot z^{lp} Y(1/z) \quad (9)$$

という形で時間逆順の出力  $Y'(1/z)$  を求めた後、時間を反転させて  $Y'(z)$  を求めるという手順を踏む。

### GTA-45 U 用補正フィルタの設計

補正フィルタの設計にはフィルタの係数も含む内部構造を正確に理解する必要がある。始めに GTA-45 U の AD 変換チップ CS 5322/5323 の内部構造について説明する。このチップは入力信号のサンプリング周波数（マスタークロックで設定）とデシメーション比（内蔵する第 2 段のフィルタの設定）によってサンプリング周波数を決定する。デジタルフィルタ CS 5322 はアナログ変調器 CS 5323 を前段に置いて使われ、入力信号はその変調器の出力である。GTA-45 U では地震研の観測システムで用いられる短周期地震計用 100 Hz および広帯域地震計用 20 Hz の出力を得るために、CS 5322 への入力信号のサンプリング周波数を 100 Hz 出力の場合 204.8 kHz、20 Hz 出力の場合 81.92 kHz に設定している。

CS 5322 内には 3 種類のデジタルフィルタが内蔵されており、入力信号はこれらを順に通過する。その概略を図 3 に示す。第 1 段のフィルタ (FIR-1) は 29 個の係数を持ち、デシメーション比 8 で出力される。第 2 段のフィルタ (FIR-2) は 13 個の係数、デシメーション比は 2 である。この第一段、第二段のフィルタは、オーバーサンプリングの

手法では良く用いられる楕円フィルタですべての零点を単位円上に持つ。第二段のフィルタは同じものを 8 回まで通過可能で、最低 2 回、最大 8 回のフィルタを通過することで第二段全体でのデシメーション比は 4（2 回通過）から 256（8 回通過）まで調節可能である。GTA-45 U 内での設定は 100 Hz 出力の場合 128（7 回通過）、20 Hz 出力の場合 256（8 回通過）である。第三段のフィルタ (FIR-3) は 101 個の係数を持ち、この出力を 2 サンプルごとにデシメーションして最終的な出力となる。CS 5322 全体でのデシメーション比は 100 Hz 出力の場合 2,048、20 Hz 出力の場合 4,096 である。内部処理が異なるので 100 Hz 出力と 20 Hz 出力の補正フィルタは別個に設計しなければならない。各段のフィルタは 130 dB のダイナミックレンジを持つので CS 5322 全体でのダイナミックレンジは 130 dB (22 bit) である。

インパルス応答は入力信号のタイミングにより 55 又は 56 サンプルの時系列をなす。20 Hz の出力の場合、応答にはフィルタ全体でのデシメーション比 4,096 だけの任意性がある。一例として 55 サンプルで左右対称なインパルス応答を図 4 に示す。その振幅特性は 8.2 Hz（ナイキスト周波数の 82%）のところにコーナーを持ち、27 サンプル（1.35 秒）の時間遅れを補正すれば位相ずれは 0 である。このインパルス応答を線形システム  $F(z)$  とみなす。(1) 式で

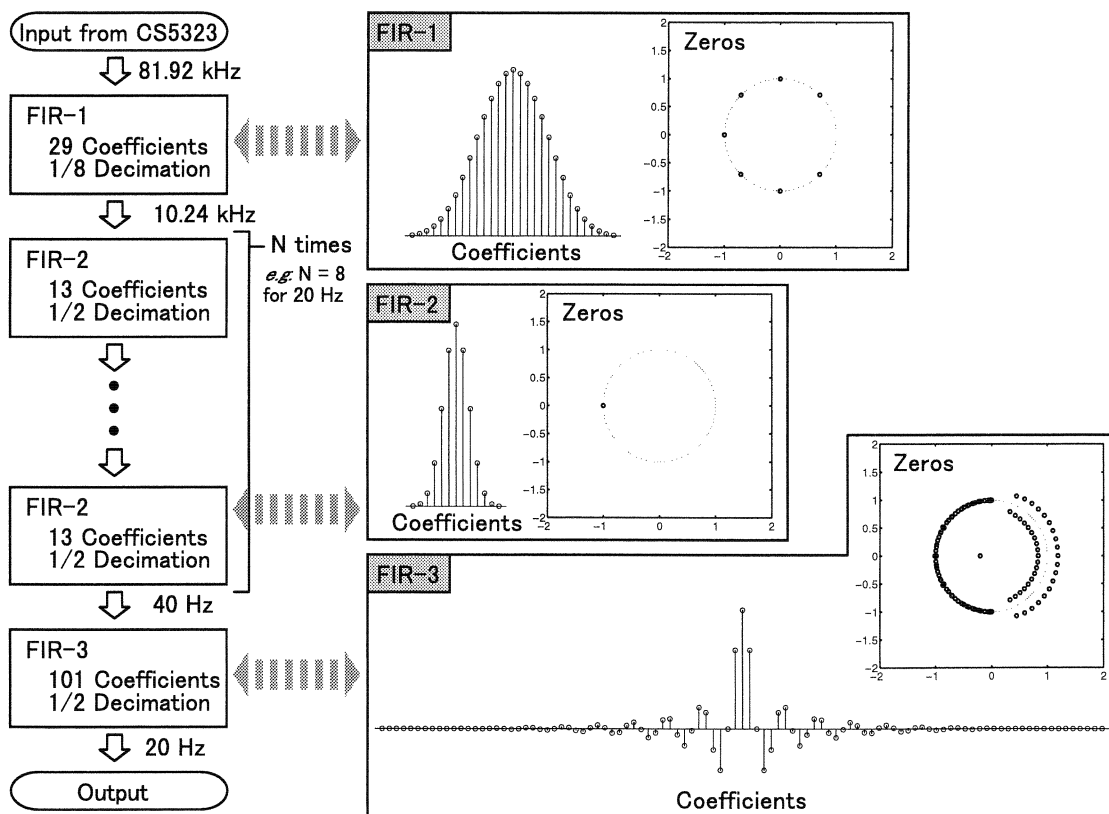


図 3. CS 5322 の内部処理と各フィルタの係数、 $z$  平面上の零点配置。

の  $N, lp$  はそれぞれ 54, 27 となる.

図 5 に図 4 のインパルス応答について  $F(z)$  の零点配置, および最大位相成分  $F_{\max}(z)$  と最小位相成分  $F_{\min}(z)$  の零

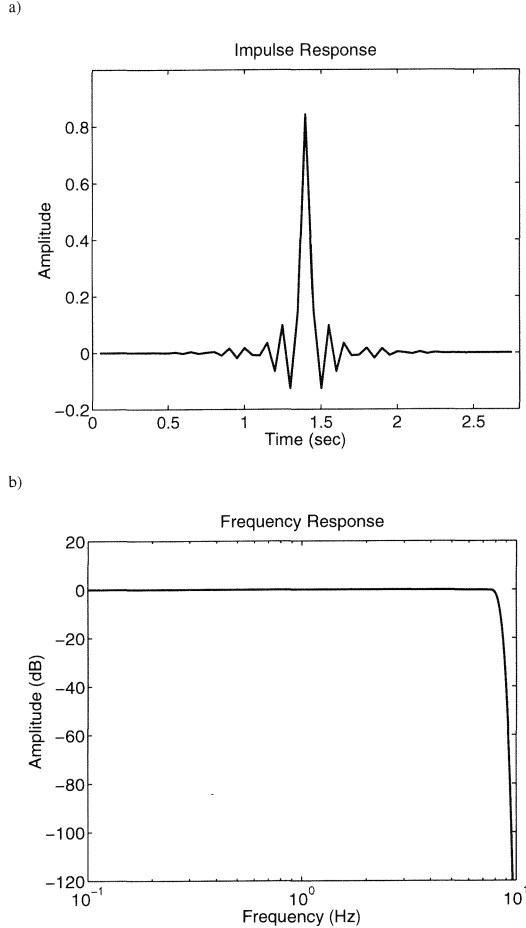


図 4. GTA-45 U, 20 Hz 出力の a) インパルス応答と, b) 周波数特性.

点配置を示す. この場合の位相補正用全域通過フィルタ  $H(z)$  の零点と極は図 6 になる.  $H(z)$  に含まれる  $F_{\max}(z)$  の係数を 20 Hz と 100 Hz についてそれぞれ書き下すと表 1 のようになる. これに図 4 のインパルス応答を通し, さらに時間反転し 27 サンプル遅らせると因果的なインパルス応答が得られる (図 7 a). この因果的信号は振幅特性は図 4 b と同じであるが, もはや線形位相ではなく図 7 b のような位相特性を持つ.

以上は理想的に補正できる例であるが, すべての非因果的信号が完全に補正できるわけではない. CS 5322 ではデシメーションを繰り返しているので, 出力信号はもとの入力信号の情報を失っている. 20 Hz 出力の場合, インパルスのタイミングによって 4,096 通りのインパルス応答が存在するが, 補正のために用いるのはこのうちの 1 通りの応答でしかない. 他の 4,095 通りの応答は設計したフィルタでは完全に補正することはできず, 補正漏れの非因果的信号を伴う. 図 8 はいくつかのインパルス応答に同じ補正を施した場合の補正漏れを拡大したものである. この補正漏れは最悪の場合で入力信号の 3% 程度になる. さらに入力信号と反対の向きの振幅を生じることから, 実際の地震波に適用した場合には初動の極性を誤認する可能性がある.

### リアルタイム補正

位相補正プロセスを地震研の収録システムに組み込み, リアルタイムで補正を行うには連続データを処理しなければならない. 補正フィルタ  $H(z)$  は無限インパルス応答 (IIR) フィルタであるから, これを用いて時間逆順で解析を行うには一見無限時間後のデータが必要である. しかし CS 5322 のダイナミックレンジは 22 bit に限られているので, 計算精度はこの範囲で良い. すると連続データから各時刻に一定の有限時間 (サンプル数  $T$ ) のデータを切り出

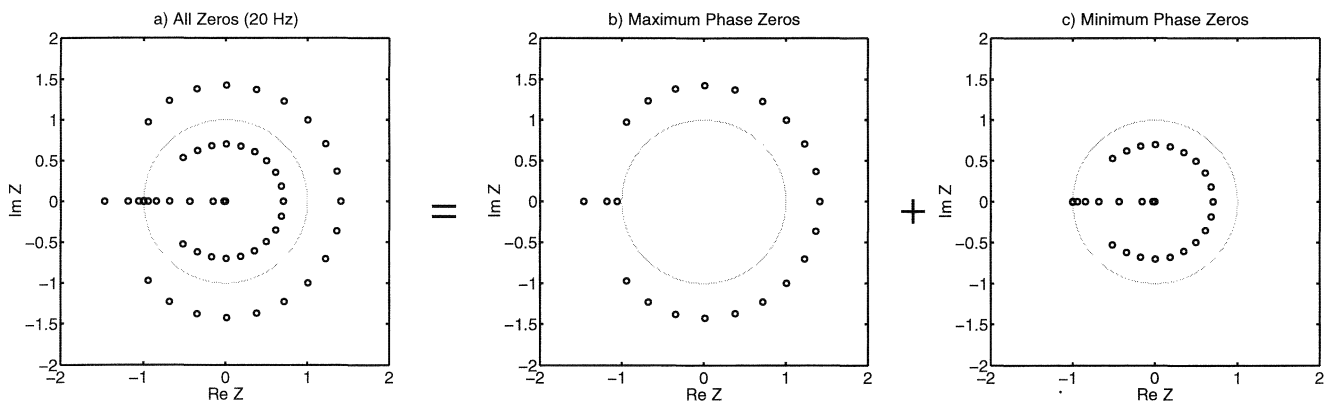


図 5. GTA-45 U, 20 Hz 出力の a)  $F(z)$ , b) 最大位相成分  $F_{\max}(z)$ , 最小位相成分, c)  $F_{\min}(z)$  の  $z$  平面上の零点配置.

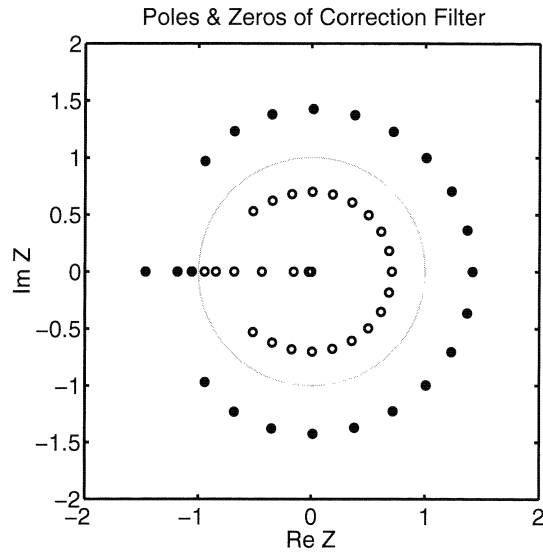


図 6. 位相補正用全域通過フィルタ  $H(z)$  の  $z$  平面上の零点と極の配置。白丸は零点，黒丸は極を表す。

すことで連続データを処理できる。このサンプル数  $T$  は、「ある時刻  $t$  について、時刻  $t+T$  サンプルに存在するインパルスが補正によって時刻  $t-27$  サンプル前（直線位相補正を考慮する）に及ぼす影響が  $1/2^{21}$  ( $=4.76 \times 10^{-7}$ ) 以下になる」という条件を満たすように決められる。GTA-45 U 用に設計した補正フィルタの場合、 $T=220$  である。

地震研究所のデータ収録では win 形式（卜部，1994）を用いている。この形式ではすべてのデータを秒単位のブロックで取り扱う。従って、ある 1 秒のブロックを補正するにはその後 220 サンプル分のデータ及び線形位相補正 27 サンプル分の連続データを計算機のメモリ上に貯え、位相補正をした後に対応する 1 秒のブロックのみをハードディスクへ保存する。図 9 はこの処理の流れを図示したものである。こうして補正されたデータは 1 秒ごとの処理であっても連続する秒ブロックの間で不連続になることはない。

### 実際のデータへの適用

これまでに述べたリアルタイム位相補正処理を施した波形が冒頭図 2b で示したものである。観測センター（東京）のデータ収録には 1997 年 9 月 13 日より、信越観測所では 1998 年 4 月 28 日よりこの処理を導入している。現在観測センター（東京）のワークステーション goemon (Sun Ultra-1) では 100 Hz サンプリングの記録 120 成分、20 Hz サンプリングの記録 57 成分をリアルタイム処理している。他機関へ配信しているデータにはこの処理は施されていない。

20 Hz で収録している広帯域地震計の記録ではこれまで

表 1-1. 20 Hz データ用 位相補正 FIR フィルタの係数

1	-6.848946653598491e-010
2	-1.243821469008616e-006
3	-6.009551369431584e-005
4	-2.851418643370080e-004
5	3.438277763107890e-004
6	-5.454639062431820e-005
7	-9.657432003725654e-004
8	2.875039614661998e-003
9	-5.315787950569472e-003
10	7.158857773906195e-003
11	-6.490836487081344e-003
12	1.013145329323092e-003
13	1.108197557304293e-002
14	-2.989407302997111e-002
15	5.260066067128610e-002
16	-7.276673818815428e-002
17	8.071527356320655e-002
18	-6.535141935140915e-002
19	1.748462751853949e-002
20	6.574322284704862e-002
21	-1.761376923393589e-001
22	2.905057875336438e-001
23	-3.685299242252171e-001
24	3.531848488636056e-001
25	-1.738280564553984e-001
26	-2.487923749481466e-001
27	1.000000000000000e+000

表 1-2. 100 Hz データ用 位相補正 FIR フィルタの係数

1	-6.845974611438912e-010
2	-1.243690340479706e-006
3	-6.009359416257024e-005
4	-2.851426380497788e-004
5	3.438235966731218e-004
6	-5.453144054324040e-005
7	-9.657735366911688e-004
8	2.875083387967830e-003
9	-5.315830275700765e-003
10	7.158866313153294e-003
11	-6.490762634605955e-003
12	1.012934611466973e-003
13	1.108236259579223e-002
14	-2.989463197799808e-002
15	5.260131411550887e-002
16	-7.276731749890833e-002
17	8.071552512309668e-002
18	-6.535104629968184e-002
19	1.748337179876212e-002
20	6.574546345260436e-002
21	-1.761407297376335e-001
22	2.905090219698770e-001
23	-3.685322818905643e-001
24	3.531848543106181e-001
25	-1.738242229156720e-001
26	-2.488000625917192e-001
27	1.000000000000000e+000

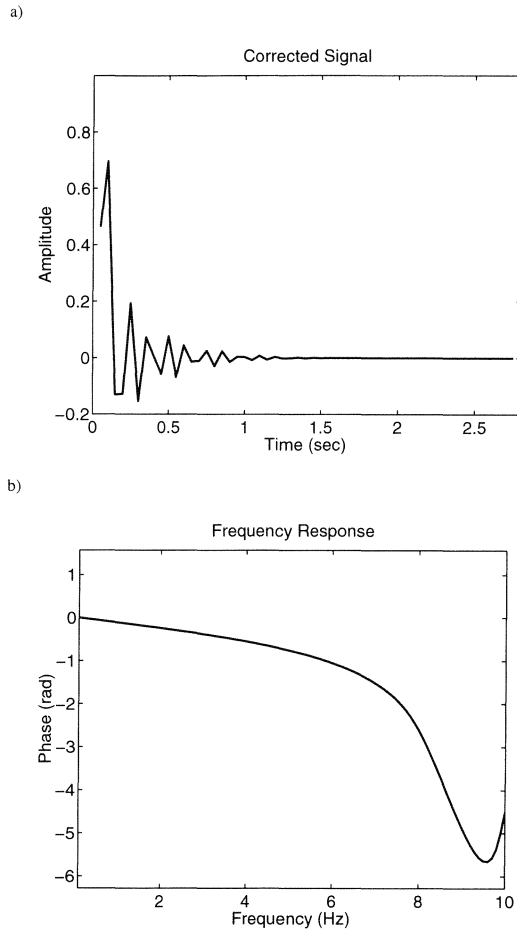


図 7. 補正されたインパルス応答の a) 時系列と b) 位相特性.

ほとんどの観測点の記録に非因果的信号が見られたが導入後はかなり抑えられている。但し位相補正によって直線位相でなくなっている点は今後位相速度の解析等をする際には注意する必要がある。

一方初動検測に用いられる 100 Hz の地震計の記録の場合、図 2a で示した程度の振幅を持つ非因果的信号はもともと特定の観測点にしか見られなかった。これは非因果的信号を生み出すようなナイキスト周波数付近の高周波の地震波は減衰が激しく、ごく震源近傍の観測点でしか観測されないことによる。地震研の観測網では日光足尾地域がこの条件に該当し、多数の微小地震によって震源近傍の観測点で頻繁に非因果的地震波が記録されていた。

このデータを補正した効果は独立に決定された初動位相の検測値を比較することで顕著になる。日光観測点 (NIK) の記録は非因果的信号を補正せずに気象庁に配信され、検測業務に用いられている。一方地震研では補正後のデータで検測をしている。両者を比較しその差をヒストグラムにすると図 10 のようになる。明らかに気象庁の検測値は地震研のものより早い傾向があり、非因果的信号を初動と誤認していることがうかがえる。0.1 秒以上の誤差を生じる場合も多く、これらは単純に P 波速度から計算すると 500 m 以上の震源位置の誤差に結びつく。この観測点以外に多くの観測点を用いて震源決定している場合には深刻な震源決定誤差には結びつかないが、この地域の観測点の同じような記録のみを用いて解析した場合には系統的な誤差要因

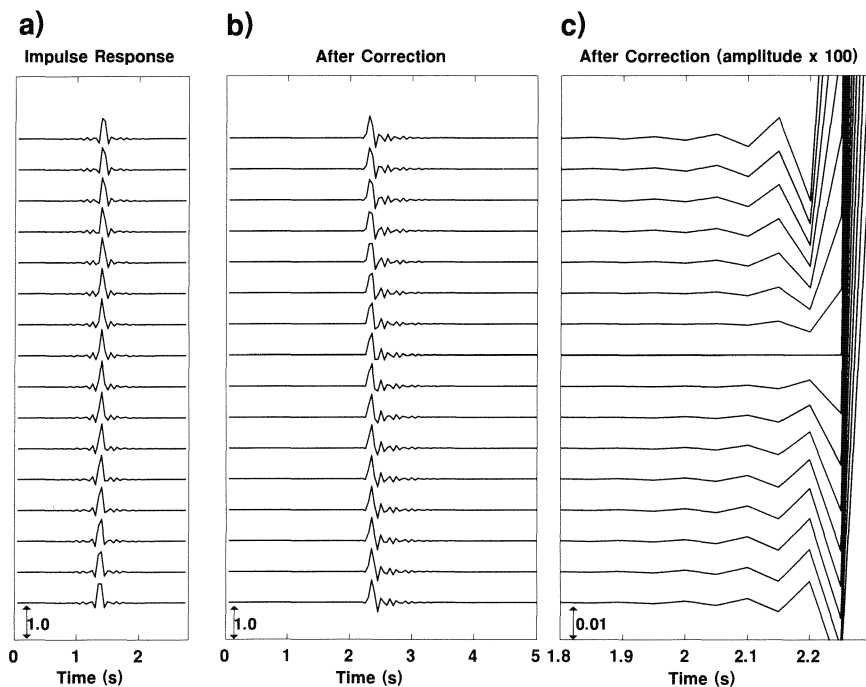


図 8. 補正漏れの例. a) 様々なインパルス応答. b) 位相補正後の応答. c) 立ち上がり部拡大 (時間軸 10 倍, 振幅 100 倍). 補正漏れは最大で入力最大振幅の約 3% になる.

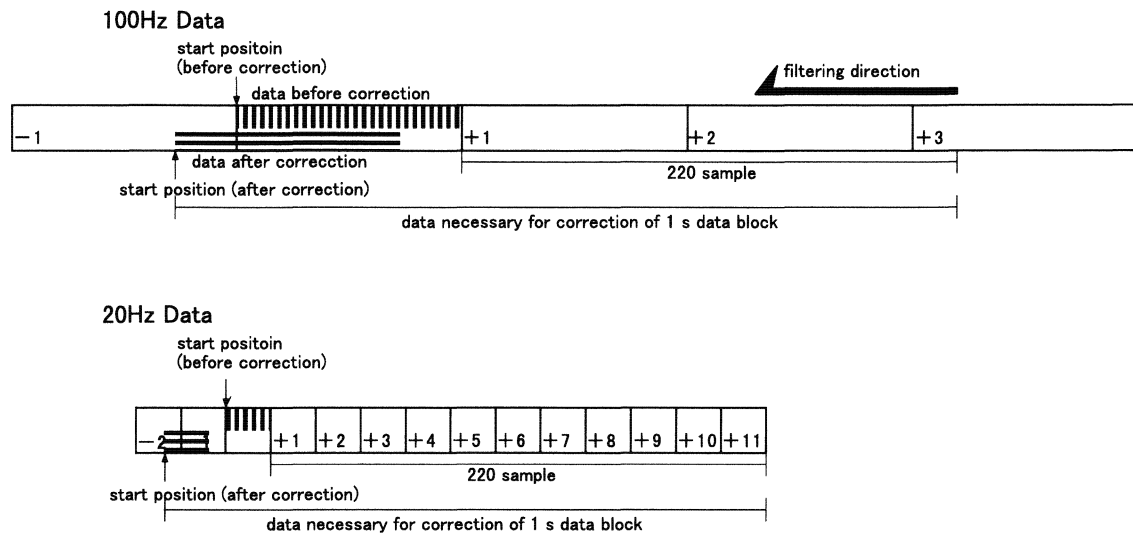


図 9. リアルタイム処理の際に処理される秒ブロックの範囲を示す図. 各四角形は1秒ブロックを示す. 左下の-2, -1, 0, +1, +2, ……という数字は処理中の時刻を基準とした秒数で+は未来を表す. ある1秒のブロックを補正するためにこれだけの前後のブロックが必要.

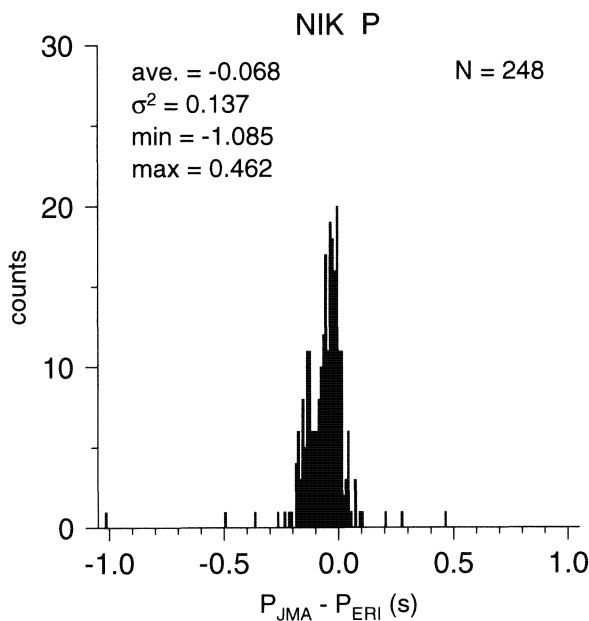


図 10. 観測点 NIK の初動検測値の比較. 同じイベントを地震研と気象庁で独立に検測した値の度数分布. 地震研の検測値-気象庁の検測値.

になりうる.

## ま と め

地震研の定常観測網のデータ収録システムの中に, AD 変換の際に FIR フィルタによって生み出される非因果的な信号を補正するプロセスを導入した. 位相補正フィルタは, もともと直線位相特性のデータを最小位相特性に変更するような全域通過フィルタである. これを時間逆順にか

けることで非因果成分は最小化され, 検測などで一応の効果があがっている. しかし, データは高いデシメート比で間引かれたものであるために完全に位相補正をすることは不可能で, 入力信号に対し最大 3% の補正残しが存在する.

非因果的信号に起因する問題を根本的に解決するには, 収録システムへの直線位相 FIR フィルタの使用を止めなければならない. 一般の AD 変換では波形のひずみを重視することが多く, 市販のチップはほとんど FIR フィルタを用いている. むしろ初動の走時を重視する地震学の用途が特殊であるといえる. またデルタシグマ方式と FIR フィルタは密接な関係にあり, デルタシグマ方式の高ダイナミックレンジ, 低量子化ノイズの AD 変換が有用なものもまた事実である. 現在, 観測センターで用いている衛星テレメータ用のデータ変換装置, 白山工業株式会社製 LT 8500 では, AD 変換に GTA-45 U と同じ CS 5322/5323 のチップを用いている. そして FIR 2 の段階のデシメート比を小さくし高いサンプリングレートで一旦出力した後, さらに最小位相のフィルタを追加することで擬似的に最小位相の信号を作り出している. 現実的にはこのような方法なるべく最小位相に近い信号を作ることが最善であろう.

謝 辞: 本研究を行う上で武尾実教授から有益な助言をいただきました. また補正係数の計算には Dr. Scherbaum の計算値を参考にしました. 記して感謝いたします.

## 文 献

- Scherbaum, F., 1996, *Of poles and zeros*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands, pp. 256.
- Scherbaum F. and M.-P. Bouin, 1997, FIR filter effects and nucleation phases. *Geophys. J. Int.*, **130**, 661-668.



卜部 卓, 1994, 他チャンネル地震波形データのための共通  
フォーマットの提案, 地震学会講演予稿集, 2, 331.  
卜部 卓・酒井慎一・萩野 泉・酒井 要・小林 勝・羽田敏

夫・橋本信一・萩原弘子, 1995, 地震研の新しい関東甲信越地  
震観測網, 地震学会講演予稿集, 2, A 25.